УДК 62-566, 65.01, 519-714, 537.533

Л.И. Тимченко, А.А. Поплавский, Н.И. Кокряцкая, Н.С. Петровский
Государственный экономико-технологический университет транспорта, г. Киев, Украина
timchen@list.ru

Метод динамического туннелирования изображений пятен лазерных пучков для улучшения качества прогнозирования их характеристик

В статье рассматривается проблема обработки и прогнозирования динамических изображений в реальном масштабе времени. Предлагаемый подход формирования эталонного туннеля предполагает метод обработки информации, при реализации которого вычисляются центры пятен лазерных пучков с повышенной точностью, а также изображения трассы классифицируются с целью улучшения результатов дальнейшего прогнозирования их поведения.

Введение

На данный момент существующие магистральные системы передачи испытывают необходимость в существенном расширении канала. До сих пор данная потребность решалась за счет применения оптоволоконного кабеля, однако применение его на дальних дистанциях сопряжено с многими технологическими сложностями, которые в той или иной мере приводят к увеличению стоимости строительства и эксплуатации подобной системы. Одной из самых перспективных технологий как на больших, так и на малых дистанциях являются атмосферные системы передачи, позволяющие передавать значительные объемы информации посредством лазерного луча. Особенно перспективными в данном направлении выглядят системы, позволяющие передавать информацию со спутника на Землю [1].

Для обеспечения спутниковой связи с помощью лазера необходимо постоянное позиционирование принимающего и передающего устройств с высокой точностью. При этом величина ошибки позиционирования не должна превышать тысячной доли градуса, искажения приёма будут настолько высоки, что связь не состоится.

Поскольку под влиянием движения спутника, а также искажения, вызванного турбулентностью воздушных масс, геометрические параметры и положение пятна лазерного пучка постоянно изменяются, необходимо постоянно в режиме реального времени прогнозировать его положение.

Цель данной работы – решить задачу эффективного прогнозирования определения центра пятенного объекта с помощью максимального использования его информационных признаков, а также классифицировать кадры последовательности изображений пятен лазерных пучков (ПЛП), с целью фильтрации лазерной трассы от сильно искаженных действием помех изображений, тем самым сформировать туннель эталонных изображений.

В данной работе предлагается определять центры ПЛП с помощью контурной ленты, образующейся вследствие использования градиентных масок или других методов определения границ на нечетких изображениях. После чего необходимо проводить формирование эталонной трассы с помощью классификации, основанной на формировании динамических границ последовательностей изображений.

Контурная лента – область, образующаяся из элементов изображения, которая позволяет отделить объект от фона. Большинство методов выделения контурных признаков основывается на том, что разным объектам изображения отвечают области с относительно одинаковыми значениями яркости. На границах же яркость заметно меняется.

В качестве примера в работе используется алгоритм фильтрации по алгоритму Робертса. После наложения градиентной маски на изображение определяются внешние и внутренние границы объекта. Внутренняя граница задаёт базовый центр тяжести объекта, в то время как область между внешней и внутренней границей используется для его коррекции.

Для нахождения центра тяжести контура необходимо найти площадь и статические моменты инерции контура, которые рассчитываются по формулам, изложенным в работе [2]. Следующим шагом является вычисление площади контура. Поскольку контур можно рассматривать как многоугольник, то площадь контура, заданная своими вершинами в порядке обхода, определяется в виде замкнутой кривой без самопересечений.

Коррекция центра объекта происходит следующим образом.

Используются только точки, лежащие в области между внешней и внутренней границей. Сначала находим приведенное максимальное значение яркости в контурной области. Каждой точке в данной области $x(i,j)$, где i, j – соответственно абсцисса и ордината точки, назначается своя пара весовых коэффициентов влияния, κ_i и κ_j. Далее определяются параметры коррекции и находятся координаты скорректированного центра, что также описано в работе [2].

Формирование границ туннеля

Изменения положения пятна в трассе можно описать случайным процессом. Предположим, что определенная последовательность кадров трассы содержит лишь унимодальные значения координат центров пятен лазерных пучков [3]. Таким образом, можно утверждать, что появление определенного значения координат ПЛП можно описать нормальным законом распределения с математическими ожиданиями $\mu_x(t)$, $\mu_y(t)$ и среднеквадратическими отклонениями (СКО) $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$. Тогда данные значения могут быть найдены по соответствующим формулам:

$$\mu_x(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{t-i}}{N}, \quad (1)$$

$$\sigma_x(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_{t-i} - \mu_x(t))^2}{N}}, \quad \sigma_y(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_{t-i} - \mu_y(t))^2}{N}}. \quad (2)$$

В реальных условиях центр ЛП в смежных кадрах за счет воздействия окружающей среды или других факторов может быть несколько смещенным, поэтому в данном случае одного распределения становится недостаточно и его параметры нужно корректировать.

При формировании и обновлении координат границ туннеля [4], [5] удобно использовать смоделированные одним нормальным распределением средние значения координат центров лазерных пучков. Тем не менее, если скорость изменения координат

центра пятна не нулевая и туннель имеет узкие границы, существует вероятность попадания координат центров, важных для прогнозирования пятен, во внетуннельную зону, что приводит к увеличению погрешности прогнозирования. Чтобы этого избежать, необходимо корректировать границы туннеля в соответствии с изменениями координат центров лазерных пучков, при этом, исключая кадры с существенно искаженными центрами, не принадлежащими к туннельной зоне. Предлагается выделять смещения центров ПЛП с помощью туннеля и корректировать туннель в случае плавных смещений. При формировании начальных границ туннеля целесообразно проверить следующие условия:

$$\sigma_t(1-P) > \sigma_{t-1}. \tag{3}$$

В случае выполнения условия (3) необходимо дополнительно проверить условие:

$$\left|\frac{dx}{dt}\right| > G, \tag{4}$$

где $P \in [0{,}95 - 0{,}99]$ – доверительная вероятность, G – пороговое значение смещения.

Невыполнение условия (3) свидетельствует о том, что данная координата отвечает модели с накопительными параметрами, а выполнение условия (4) указывает на наличие существенного смещения центра. При формировании границ туннеля в случае, если условие (4) выполняется, предлагается учитывать параметры данной точки с наименьшим весовым коэффициентом.

Достаточную информацию для этого обеспечивает детектор выхода за границы туннеля, следящий за попаданием координат центра лазерного пучка в туннель и фильтрующий одиночные помехи. При наличии такой информации обновление границ туннеля происходит согласно формулам:

$$x_t = (1-k)x_{t-1} + k\mu_{xt},$$
$$y_t = (1-k)y_{t-1} + k\mu_{yt},$$
$$k = \begin{cases} k_1, (x_t \in [-\infty; x_{t-1} - w/2] \cup [x_{t-1} + w/2; +\infty]) \cap (y_t \in [-\infty; y_{t-1} - w/2] \cup [y_{t-1} + w/2; +\infty]), \\ k_2, x_t \in [x_{t-1} - w/2; x_{t-1} + w/2] \cup y_t \in [y_{t-1} - w/2; y_{t-1} + w/2], \end{cases}$$
$$0 \le k_1 < k_2 < 1, \tag{5}$$

где x_t – координата средней линии туннеля в t-й момент времени, μ_{xt} – математическое ожидание x_t, w – ширина туннеля, k_1, k_2 – параметры, определяющие скорость обновления границ туннеля. Поскольку невозможно создать идеальный детектор границ туннеля, и с учетом возможности резкого изменения положения центра ЛП, не рекомендуется k_1 присваивать нулевое значение, т.к. при этом кадры с внетуннельными центрами никогда не будут учтены. Это может привести к полной потере входной информации при импульсном изменении центра положения пучка или к необходимости ручной коррекции положения средней линии туннеля. При больших значениях k_2 влияние текущего значения положения центра лазерного пятна будет настолько весомым, что пятна с координатами, близкими к значениям границ туннеля, и соответственно, в большинстве случаев с большим значением шумов, будут также существенно влиять на среднюю линию туннеля. Рекомендованные экспериментально подобранные значения: $k_1 = 0{,}09$; $k_2 = 0{,}35$.

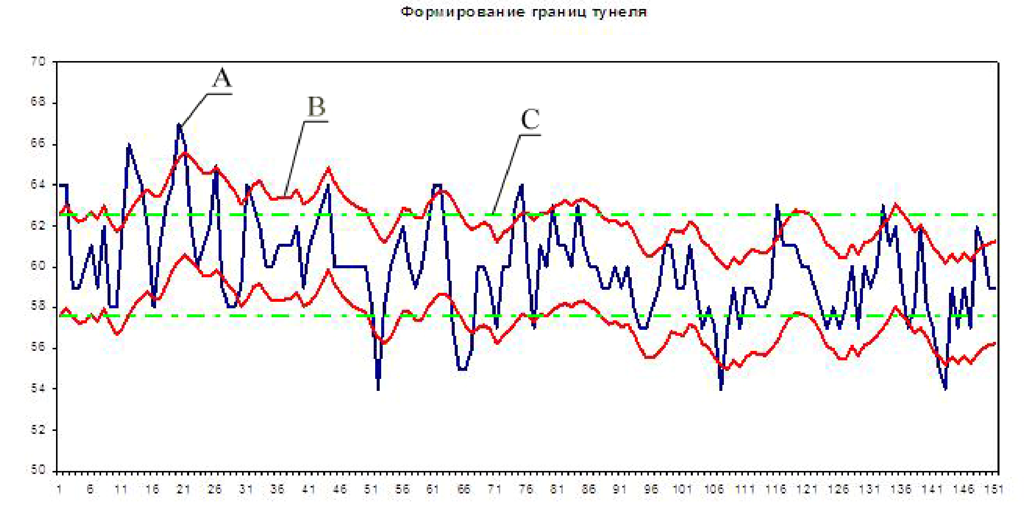


Рисунок 1 – Формирование границ туннеля. А – изменение координаты центра ЛП в трассе; В – динамическая граница туннеля; С – статическая граница туннеля

На рис. 1 показано динамическое изменение границ туннеля в соответствии с изменением положения координат центра лазерного пучка во времени. Из рисунка видно, что количество точек, попадающих в туннельную зону, значительно больше в случае формирования динамических границ, чем статических. Данная методика дает возможность классифицировать изображения трассы на группы изображений, координаты центров которых вошли в туннельную или во внетуннельную зоны, принимая во внимание информативные признаки обеих групп. Таким образом, при прогнозировании следующего кадра учитываются не только «эталонные» изображения и соответствующие им математические ожидания, а и возможность наложения шума на изображение.

Результаты экспериментальных исследований

Обработав значительное количество изображений (15 лазерных трасс по 1000 изображений в каждой), можно отметить, что данный метод улучшает результаты алгоритмов прогнозирования поведения изображений на 15 – 20 %, за счет использования дополнительно информации яркостей точек, находящихся на границе между фоном и объектом, и устранения сильно искаженных действием помех для кадров изображений.

Результаты обработки трассы № 10 с разными значениями ширины туннеля приведены в табл. 1.

В табл. 1 введены обозначения: W – ширина туннеля; H_n – количество попаданий в туннель (координаты центров объекта получены разработанным алгоритмом определения центров с повышенной точностью); H_c – количество попаданий в туннель (координаты центров объекта получены классическим методом); P_n, P_c – процент попаданий в туннель; R – разность процентного попадания в туннель разработанного и классического методов.

Существует большое количество способов прогнозирования [6] величины следующего шага некоторого временного ряда, отличающихся по количеству необходимых вычислений, погрешностью прогнозирования и количеством шагов, на которые может прогнозировать данный алгоритм. Однако в случае работы в реальном времени на первое место выходят скорость обработки и аппаратные затраты на выполнение алгоритма.

Таблица 1 – Зависимость количества попаданий в туннельную зону Разработанный и классический методы

W	H_n	P_n(%)	dH_n/dW	H_c	P_c(%)	dH_c/dW	R(%)
0,2	491	24,7	219	472	23,8	228	1,0
0,3	750	37,7	259	702	35,3	230	2,4
0,4	992	49,9	242	922	46,4	220	3,5
0,5	1202	60,5	210	1124	56,6	202	3,9
0,6	1410	71,0	208	1304	65,6	180	5,3
0,7	1553	78,2	143	1490	75,0	186	3,2
0,8	1694	85,3	141	1650	83,0	160	2,2
0,9	1788	90,0	94	1750	88,1	100	1,9
1	1860	93,6	72	1809	91,0	59	2,6
1,1	1909	96,1	49	1868	94,0	59	2,1
1,2	1924	96,8	15	1906	95,9	38	0,9
1,3	1944	97,8	20	1925	96,9	19	1,0
1,4	1969	99,1	25	1941	97,7	16	1,4
1,5	1980	99,6	11	1952	98,2	11	1,4
1,6	1983	99,8	3	1964	98,8	12	1,0
1,7	1984	99,8	1	1975	99,4	11	0,5
1,8	1987	100,0	3	1983	99,8	8	0,2
1,9	-	-	-	1984	99,8	1	0,2
2	-	-	-	1984	99,8	0	0,2
2,1	-	-	-	1985	99,9	1	0,1
2,2	-	-	-	1985	99,9	0	0,1
2,3	-	-	-	1986	99,9	1	0,1
2,4	-	-	-	1987	100,0	1	0

В табл. 2 представлены данные о средней ошибке прогнозирования некоторых методов прогнозирования для известного метода предобработки и метода ПКЛ без туннелирования (δ_{xcp} – средняя относительная погрешность метода, рассчитывалась между действительным и прогнозируемым значением).

Таблица 2 – Средняя ошибка прогнозирования значения координаты X изображения центра пятна лазерного пучка без туннелирования

Название метода	Относительная погрешность при прогнозировании на 1 шаг, δ_{xcp},%	
	Известный метод предобработки	Метод предобработки «контурной ленты»
Числовые модели[7]		
1)Экспоненциальное сглаживание, аддитивная модель	1,05	0,93%
2) Экспоненциальное сглаживание, модель Винтера	1,05	0,93
3) Авторегресионная модель [8]	2,47	1,87
Нейронные сети[9]		
4) Радиально базисная функция РБФ S5[10]	0,78	0,67
5) Линейная сеть S5 [11]	0,76	0,62
6) Многослойный персептрон структуры MP5-5-4	0,76	0,66

Данные алгоритмы были промоделированы в программе STATISTICA 6.0 [12]. Как видно из табл. 2 для одних и тех же методов, метод «контурной ленты» показывает результаты на 15 – 20 % лучше, чем известный метод. Данные ошибки прогнозирования при использовании алгоритма туннелирования на примере координаты X представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Средняя ошибка прогнозирования значения координаты X центра пятна лазерного пучка с туннелированием

Название метода	Относительная погрешность при прогнозировании на 1 шаг, δ_{xcp},%	
	Известный метод предобработки	Метод предобработки «контурной ленты»
Числовые модели		
1)Экспоненциальное сглаживание, аддитивная модель	0,99	0,87
2) Экспоненциальное сглаживание, модель Винтера	1,00	0,87
3) Авторегресионная модель	2,05	1,46
Нейронные сети		
4) Радиально базисная функция РБФ S5	0,75	0,64
5) Линейная сеть S5	0,74	0,62
6) Многослойный персептрон структуры MP5-5-4	0,74	0,63

Из табл. 3 видно, что метод «контурной ленты» является лучшим с точки зрения предварительной обработки для прогнозирования центра лазерного пучка. Также можно отметить, что погрешность δ_{xcp} меньше при использовании алгоритма туннелирования и нейронных сетей, поэтому они являются более предпочтительными для применения по сравнению с численными методами.

Выводы

К основным преимуществам данного метода по сравнению с классическими методами [13], [14] определения центра фигуры [15] можно отнести следующие:

1. Точность определения центра увеличена за счет учета особенностей контурной линии.
2. Алгоритм реагирует на наименьшие изменения границы объекта динамического изображения и соответствующим образом влияет на определение его центра.
3. Формирование границ туннеля не требует значительных затрат времени.
4. Диапазон допустимых входных значений ограничен лишь возможностями вычислительной системы (алгоритм корректно работает с резкими изменениями положения центра ЛП).
5. Эксперименты показывают, что предложенный метод предварительной обработки изображений на основе «контурной ленты» является более предпочтительным по сравнению с применением известных методов предварительной обработки изображений для прогнозирования положения лазерного пучка.

Литература

1. Laser Control of Near Earth Space and Possbilities for Removal of Space Debris from Orbit with Explosive Photo-Dissociation Lasers with Phase Conjugation / Basov N.G., Zemskov E.M., Kutaev Y.F. [et. al.] // Proc. GCL/HPL 98. SPIE Symposium, St-Petersburg (Russia), 1998.

2. Использование градиентных масок для быстрого определения центров изображений пятен лазерных пучков с повышенной точностью / Л.И. Тимченко, А.А. Поплавский, Н.И. Кокряцкая, А.В Поплавский // Искусственный интеллект. – № 3. – 2010.
3. Method for Processing of Extended Laser Paths Images / Timchenko L.I., Kutaev Yu.F., Kozhemyako V.P., [et. al.] // J. Advances in Electrical and Computer Engineering. Suceava (Romania). – 2003. – Vol. 3 (10), № 2 (20). – P. 66-78.
4. Timchenko L.I. «Parallel - hierarchical transformation as the system model of efficient means of artificial intelligence» Precis of the Dissertation for Doctor of Science (Eng) Degree: 05.13.23, State Scientific - Research Institute of Information Infrastructure / Timchenko L.I. – Lviv, 2002. – 36 p.
5. System of coordinates referencing for non-stationary signals / Timchenko L., Kutaev Yu F, Gertsiy A.A. [et al.] // J. of Russian Academy of Science, series «Physics». – 2001. – № 6. – P. 886-890.
6. Chetirkin E.M.. Statistical prediction methods / Chetirkin E.M. – Moskow : Статистика, 1987. – 200p.
7. Brockwell P.J. Introduction to Time Series and Forecasting, second edition / P.J. Brockwell, R.A. Davis. – New York Springer-Verlag,., 2002,
8. Box George; Jenkins Gwilym,Time series analysis: forecasting and control, rev. 3 Prentice Hall PTR Upper Saddle River. – NJ, USA, 1994. – 592 p.
9. Haykin S. Neural Networks / Haykin S. – [2nd ed.]. – New Jersey : Prinston Hall, 1999. – 1104 p.
10. Robert J. Howlett Radial basis function networks 2: new advances in design / Robert J. Howlett, L.C. Jain. – Springer, 2001. – 360 p.
11. Dimitri P. Bertsekas Linear network optimization: algorithms and codes / Dimitri P. Bertsekas, Borovikov V.P. – MIT Press, 1991. – P. 109-122.
12. Borovikov V.P. STATISTICA. Art analysis of data on your computer / Borovikov V.P. – St.Petersburg : Питер, 2003. – 688 p.
13. Pratt W. Digital processing of images / Pratt W. – Moskow : Mir, 1982. – Vol. 1, 2.
14. Pavlidis T. Algorithms of Machine graphics and image processing / Pavlidis T. – Moskow : Radio and communication, 1986.
15. Kozhemyako V.P. «Analysis of the methodological approaches in connection with the problem solving of extrapolation of object trajectory / Kozhemyako V.P., Timchenko L.I., Poplavskyy A.A. // SPIE Symposium, USA. – Vol. 5175. – 2003. – P. 222-236.

Literatura

1. Basov N.G. Proc. GCL/HPL 98. SPIE Symposium, St-Petersburg (Russia). 1998.
2. Timchenko L.I. Iskusstvennyjintellekt. 2010
3. Timchenko L.I. Advances in Electrical and Computer Engineering. Suceava (Romania). Vol 3 (10). № 2 (20). 2003. P 66-78
4. Timchenko L.I. Parallel - hierarchical transformation as the system model of efficient means of artificial intelligence. Research Institute of Information Infrastructure. Lviv. 2002. 36 p.
5. Timchenko L. System of coordinates referencing for non-stationary signals of Russian Academy of Science. Series “Physics”. №6. 2001. P 886-890
6. Chetirkin E.M.. Statistical prediction methods. Moscow: Statistika. 1987. 200 p.
7. Brockwell P.J. Introduction to Time Series and Forecasting. Second edition. Springer-Verlag. New York. 2002.
8. Box George. Time series analysis: forecasting and control, rev. 3Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ, USA. 1994. 592p.
9. Haykin S. Neural Networks. 2nd ed. New Jersey,:Prinston Hall. 1999. 1104p.
10. Robert J. Radial basis function networks 2: new advances in design. Springer. 2001. 360p.
11. Dimitri P, Linear network optimization: algorithms and codes.MIT Press. 1991. P 109-122
12. Borovikov V.P. STATISTICA. Art analysis of data on your computer.St.Petersburg.: Piter. 2003. 688 p.
13. Pratt W. Digital processing of images. Moscow; Mir. Vol 1-2. 1982
14. Pavlidis T. Algorithms of Machine graphics and image processing. Moskow: Radio and communication. 1986
15. Kozhemyako V.P. SPIE Symposium. USA. Vol 5175. 2003. P 222-236

L.V. Timchenko, A.A. Poplavskij, N.I. Kokrastskaja, N.S. Petrovskij

Method of Dynamic Laser Beam Spot Images Tunnelling for Upgrading of Prediction of their Characteristics

The paper is devoted to the problem of processing and prediction of dynamic images in real time scale. The offered approach of forming of master tunnel assumes the method of information processing where the centers of laser beam images are calculated with improved accuracy and then the sequence of images is classified for the purpose of prediction upgrading.

Статья поступила в редакцию 22.06.2011.